

УДК 681.2.084

Моделирование выходного сигнала механолюминесцентного датчика динамического давления

Макарова Н. Ю.^{1,*}

^{*}mak-nat@inbox.ru

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Рассматривается механолюминесцентный датчик динамического давления для информационно–измерительных систем с волоконно–оптическими линиями связи. Датчик преобразует механическую энергию воздействия в оптическое излучение. Проведен анализ применения механолюминесцентного датчика в системах контактного осязания роботов, работающих в условиях сильных помех и высокой взрывоопасности. Представлены результаты моделирования процесса преобразования и показана зависимость светового отклика сенсора от параметров входных импульсов давления. Выявлен диапазон этих параметров, обеспечивающих наиболее интенсивный световой отклик сенсора.

Ключевые слова: механолюминесценция, оптоэлектронный сенсор, динамическое давление, математическая модель

Введение

Некоторые роботизированные системы, особенно мобильные, часто используются в условиях значительных радиационных и электромагнитных воздействий, во взрывоопасной и загазованной атмосфере. Для повышения эффективности работы роботов в таких экстремальных условиях, а также для расширения круга задач роботов их оснащают сенсорными системами. Системой контактного осязания оснащаются корпусные детали роботов, манипуляторы [1, 2]. Это делает возможным с помощью захватного рабочего органа оценить наличие контакта с внешними объектами, проанализировать усилия в месте взаимодействия, зафиксировать проскальзывание удерживаемых объектов. Кроме этого, контактные сенсоры могут использоваться для получения размеров объектов. Среди всех требований для контактных сенсорных систем особо необходимо отметить механическую надежность, малые габариты, значительную чувствительность, высокое пространственное разрешение и надежность [3]. В условиях экстремальных воздействий особенные требования предъявляются и к роботизированной системе в целом, и к датчикам (особенно к контактным), в частности.

Отмечается интенсивное применение систем с волоконно-оптическими линиями связи в структуре систем осязания мобильных роботов, работающих в условиях воздействия высоких температур и электромагнитных излучений, во взрывоопасных. Датчики, используемые в таких системах, должны на выходе иметь оптический сигнал. Датчики на основе механолюминесценции напрямую преобразуют механическую энергию в энергию оптического излучения. Они отличаются светогенерационным режимом, твердотельностью, миниатюризацией, высокой электромагнитной помехоустойчивостью, значительным быстродействием, сопряжением с волоконно-оптическими линиями связи. Датчики с распределенным механолюминесцентным чувствительным элементом пленочного типа могут применяться для тактильного осязания и визуализации полей механического напряжения и давления, так как имеют высокое пространственное разрешение. Таким образом, отмечается возможность повысить эффективность применения мобильных экстремальных роботов за счет использования в системах тактильного осязания механолюминесцентных сенсоров и волоконной оптики.

Датчик на основе механолюминесценции в структурной схеме системы контактного осязания является принципиально новым элементом, а дальнейшее преобразование выходного информационного сигнала датчика осуществляется с использованием существующих технических решений. Для того, чтобы оценить возможность применения датчика давления с механолюминесцентным чувствительным элементом в системе контактного осязания, нужно провести теоретическое и экспериментальное исследование, предполагающее создание математической модели преобразования и алгоритма обработки выходного оптического сигнала датчика. Отдельным направлением исследования считается выбор вида люминофора для регистрации давления с разным характером изменения, выявление диапазона входных механических воздействий, которые вызывают выходной оптический сигнал, детектируемый современными фотоприемниками [4]. В соответствии с предложенной автором в статье математической моделью механолюминесцентного преобразования проведено моделирование, в результате которого была получена совокупность зависимостей интенсивности оптического сигнала датчика от параметров входного воздействия для разных типов механолюминофоров.

1. Измерительная цепь с механолюминесцентным датчиком

Информационно–измерительная цепь с механолюминесцентным датчиком представлена на рис 1. Механическое воздействие (импульс механического напряжения $\sigma(t)$) преобразуется в оптическое излучение $\Phi(t)$ и подается по волоконно–оптической линии связи к блоку обработки, где сигнал преобразуется в электрический и обрабатывается по алгоритму, определяющему входное механическое воздействие [5-6].



Рис. 1. Структура информационно-измерительной схемы с механолуминесцентным сенсором импульсного давления

Для анализа силовых характеристик контактного взаимодействия совокупность единичных тактильных датчиков может размещаться на губках схватов манипуляторов. Для определения формы объекта взаимодействия может использоваться пленочный сенсорный элемент или матрица из единичных датчиков. Чувствительные элементы покрываются упругим слоем, с которым непосредственно находятся во взаимодействии объекты внешней среды. Если захватное устройство оснащено тактильными датчиками, пленочными или образующими матрицу, то робот приобретает возможность определять тип зажатой схватом детали, ее расположение и ориентацию по отношению к системе координат, связанной с захватом, и направление проскальзывания детали в случае недостаточной силы сжатия губок схвата (рис. 2) [3]. При тактильном взаимодействии детали с матрицей датчиков генерируется так называемый тактильный образ, передающийся в блок обработки робота. Робот корректирует свои действия, получая информацию о положении детали в захватном устройстве. Схваты роботов, оснащённые механолуминесцентными датчиками, позволяют получить информацию о наличии объекта манипулирования, его форме и размерах, состоянии поверхности, усилию его удержания, и степени возможного проскальзывания.

Варианты расположения тактильных механолуминесцентных датчиков на губках схвата робота приведены на рис. 2.

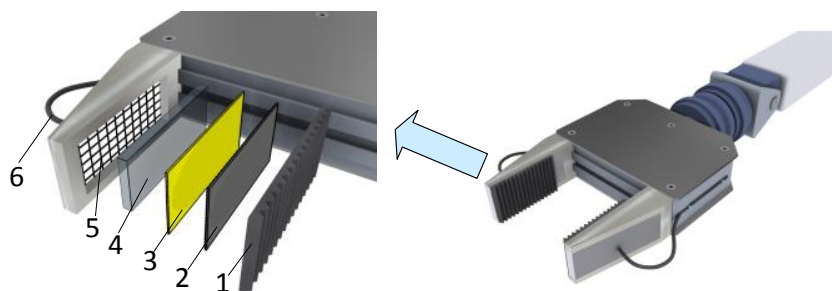


Рис. 2. Механолуминесцентные сенсорные элементы на схвате манипулятора робота: 1 – защитный упругий материал; 2 – слой, концентрирующий механические напряжения; 3 – механолуминесцентный чувствительный элемент; 4 – прозрачная пластина; 5 – матричный фотоприемник; 6 – линия связи.

Информация о контактном взаимодействии, поступающая от датчика, преобразуется и передается в систему управления роботом. Для получения картины поля давления необходимо обрабатывать сигнал от каждого единичного датчика, образующего матрицу. Алгоритм восстановления параметров механического импульса по оптическому сигналу датчика опирается на предложенную ниже математическую модель механолюминесцентного преобразования.

2. Математическая модель механолюминесцентного датчика

Изучением явления механолюминесценции (триболюминесценции или деформационной люминесценции) занимались зарубежные и отечественные ученые [6–9]. Рассмотренные труды, в основном, раскрывают теоретические основы механолюминесценции и экспериментальное исследование различных кристаллофосфоров.

При деформации некоторых кристаллов, преимущественно полупроводников группы $A^{II}B^{VI}$, генерируется нетепловое излучение люминофора, называемое механолюминесценцией. При пластической деформации кристаллов происходит движение электрически заряженных дислокаций. Движение дислокаций в структуре люминофора и их взаимодействие с центрами излучения приводит к возбуждению или к ионизации центров излучения с их последующими механолюминесцентными излучательными переходами [10-11]. Анализ особенностей люминесценции в цинксulfидных кристаллофосфорах показал, что за характеристики люминесценции кристаллофосфоров отвечают активаторы, которые образуют центры механолюминесцентного свечения. По характеру затухания сигнала люминесценция может быть внутрицентральной с экспоненциальной кинетикой или рекомбинационной с гиперболической. Рекомбинационная люминесценция отличается длительным послесвечением, а внутрицентровая люминесценция характеризуется высоким энергетическим выходом.

Механолюминесцентный сенсор с внутрицентральной люминофором описывается математической моделью, основу которой составляет выражение

$$\Phi(t) = 2N_{RC} \frac{\eta}{\tau} \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \int_0^{t_{\sigma}} \dot{N}_{RC}(t) dt, \quad (1)$$

где $\Phi(t)$ - световой поток механолюминесцентного сенсора; N_{RC} - число излучающих центров в механолюминесцентном материале; η - энергия кванта механолюминесцентного излучения; τ - постоянная кинетики затухания внутрицентральной люминесценции; t_{σ} - длительность механического воздействия; $\dot{N}_{RC}(t)$ - скорость увеличения количества возбужденных центров свечения.

Модель позволяет рассчитать временную зависимость оптического сигнала механолюминесцентного сенсорного элемента при разных входных механических напряжениях с длительностью воздействия t_{σ} [5].

При пластическом деформировании движущиеся дислокации возбуждают центры излучения, число которых в люминофоре равно N_{RC} . Это взаимодействие сопровождается излучательными переходами с энергией кванта излучения η и с постоянной времени затухания внутрицентральной люминесценции τ .

Излучение механолюминесцентного сенсора с рекомбинационным люминофором описывается выражением

$$\Phi(t) = \eta\beta \left(\int_0^{t_{\sigma}} \dot{N}_{RC}(t) dt \right)^2 / \left(1 + \beta t \int_0^{t_{\sigma}} \dot{N}_{RC}(t) dt \right)^2, \quad (2)$$

где β – коэффициент, характеризующий вероятность рекомбинации.

Аналогично внутрицентральной люминесценции световой поток $\Phi(t)$ зависит от скорости ионизации центров излучения во всем объеме кристалла $\dot{N}_{RC}(t)$ при его упруго-пластическом деформировании, но кинетика излучения такого люминофора описывается гиперболическим законом.

Скорость ионизации (возбуждения) центров излучения в люминофоре $\dot{N}_{RC}(t)$ пропорциональна средней плотности движущихся дислокаций $\tilde{N}_{mD}(t)$

$$\dot{N}_{RC}(t) = 2N_{RC}(t)r_{int}(t)\tilde{N}_{mD}(t)\tilde{U}_D(t), \quad (3)$$

где $r_{int}(t)$ – расстояние взаимодействия движущейся дислокации с центром свечения; $\tilde{N}_{mD}(t)$ – средняя плотность движущихся дислокаций; $\tilde{U}_D(t)$ – средняя скорость перемещения дислокаций.

При пластическом деформировании люминофора дислокации, движущиеся со скоростью $\tilde{U}_D(t)$, находясь на расстоянии $r_{int}(t)$ от центра свечения ионизируют его с последующим излучательным переходом [11].

Напряженное состояние деформированного механолюминесцентного сенсорного элемента рассматривалось с использованием микродинамической теории пластичности. Благодаря этому установлена зависимость макроскопических параметров внешнего воздействия (механического напряжения и деформации) с микроскопическими параметрами, описывающими упругопластическое деформирование [12-13].

Скорость пластических деформаций $\dot{\epsilon}_1^p$ пропорциональна вектору Бюргерса $|\vec{b}|$, характеризующему искажение кристаллической решетки кристалла дислокацией, плотности подвижных дислокаций и их скорости и описывается выражением

$$\dot{\varepsilon}_1^p = |\vec{b}| \tilde{N}_{mD} \tilde{U}_D = \frac{4}{3} |\vec{b}| k_s c_{tr} \left(\tilde{N}_{ID}^0 + \frac{3}{4} M \varepsilon_1^p \right) \exp \left(-\frac{D_f}{\sigma_1} \right) \exp \left(-\frac{\tilde{N}_{ID}^0 + \frac{3}{4} M \varepsilon_1^p}{\tilde{N}_{кр}} \right), \quad (4)$$

где c_{tr} – скорость распространения поперечных синусоидальных волн в кристалле; k_s – корректирующий коэффициент, учитывающий пороговый характер явления механолюминесценции (генерацию излучения только в области пластической деформации); D_f – эффективное напряжение внутреннего трения, равное двойному пределу текучести материала; σ_1 – главное значение тензора напряжения.

В процессе пластической деформации происходят изменения внутренней структуры кристалла: возрастает плотность дислокаций от средней начальной плотности $\tilde{N}_{ID}^0$ до критической величины общей плотности $\tilde{N}_{кр}$ и уменьшается их подвижность. Рост подвижных дислокаций характеризуется коэффициентом размножения дислокаций M .

Механолюминесцентный сенсорный элемент структурно представляет собой несколько слоев частиц порошкового люминофора в прозрачном связующем веществе. Вывод излучения из механолюминесцентного сенсора определяется с учетом параметров оптической среды и микроструктуры. Световой поток одного слоя частиц люминофора $\Phi_1(t)$ определяется по формулам (1), (2). Учитывая параметры конструкции чувствительного элемента, полный поток излучения, передаваемого в волоконный световод с поверхности сенсорного элемента может быть определен выражением

$$\Phi(t) = 0.5 \eta_a k_n \Phi_1(t). \quad (5)$$

Неравномерность свечения разных слоев учитывается коэффициентом k_n . Максимальная доля мощности излучения, выводимая из сенсорного элемента в волоконно-оптический канал определяется коэффициентом η_a .

Рассмотренная математическая модель позволяет рассчитать выходной оптический сигнал механолюминофора внутрицентрового и рекомбинационного типов в зависимости от входного механического воздействия. Предложенную модель датчика можно использовать для анализа изменения выходного светового потока в зависимости от величины и длительности импульсов нагружения. Адекватность математической модели подтверждена экспериментальным исследованием [14]. В экспериментах учитывались особенности воспроизведения ударных нагрузок [15].

3. Анализ результатов математического моделирования

Моделирование оптического сигнала датчика давления с механолюминесцентным сенсорным элементом при разных воздействиях, проводилось в программе MATLAB. В качестве материала с кинетикой внутрицентральной люминесценции был выбран электролюминофор ЭЛС–580М (ZnS:Mn с массовым содержанием марганца 1%). При моделировании учитываются центры излучения марганца с энергией кванта излучения

$\eta=2,2$ эВ и максимумом излучения на длине волны $\lambda=580$ нм. Кинетика затухания свечения имеет экспоненциальный характер (1) с постоянной времени $\tau=150$ мкс. В качестве рекомбинационного люминофора был выбран электролюминофор ЭЛ-510М (состав ZnS:Cu, Al; с массовым содержанием меди 0,1 %). При моделировании рекомбинационной механолюминесценции учитывалась энергия излучения, соответствующая медным центрам излучения ($\lambda=510$ нм; $\eta=2,43$ эВ) [16].

Иллюстрация работы программы, моделирующей выходной световой поток механолюминесцентного сенсора, представлена на рис. 3.

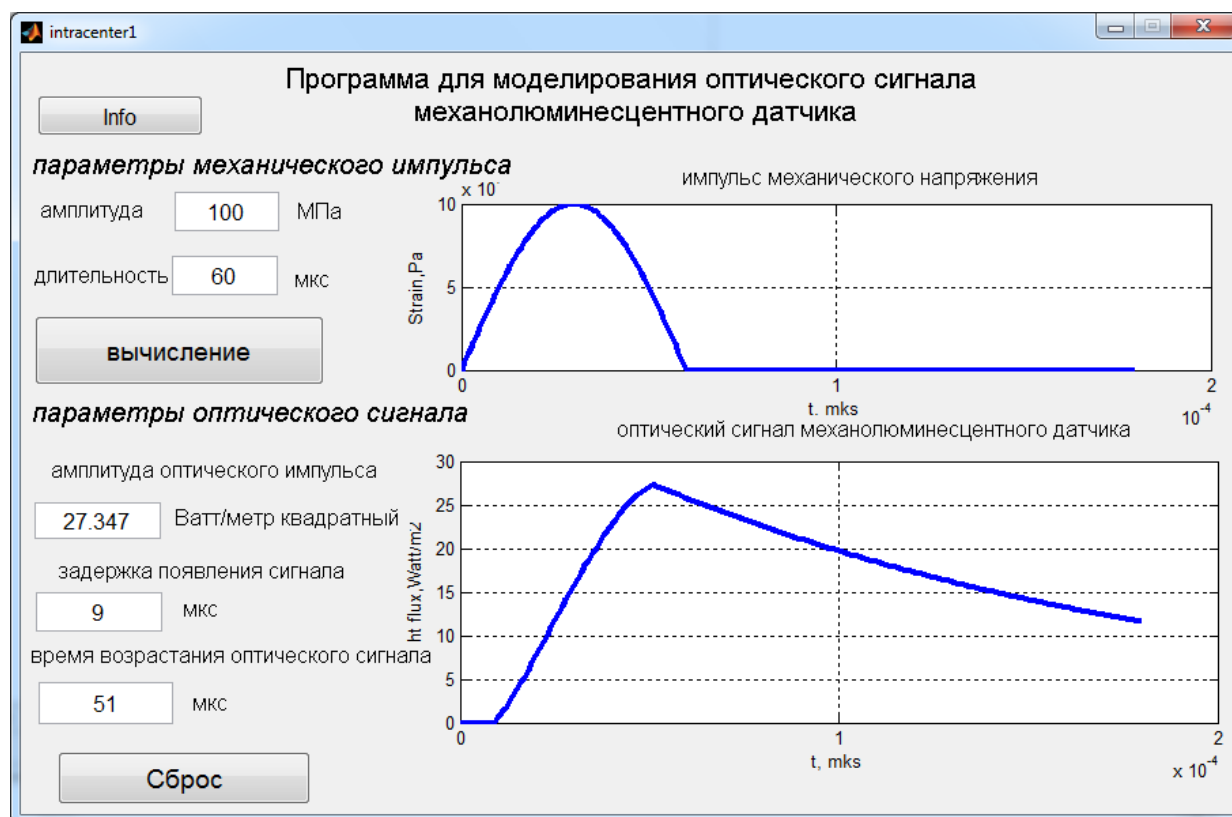


Рис. 3. Окно программы, моделирующей выходной световой поток механолюминесцентного сенсора

В программе задают максимальную величину и длительность импульса механического нагружения и вычисляют соответствующий световой отклик датчика, при этом определяют следующие параметры оптического сигнала – пиковый уровень импульса, временную задержку и участок нарастания. Временная задержка появления механолюминесцентного излучения обусловлена пороговым характером преобразования. Механолюминесцентное излучение генерируется только в области неупругой деформации, т.е. при превышении порога текучести материала механическим воздействием (для сульфида цинка порог текучести равен 45 МПа). При моделировании в программе определяют световой поток, приведенный к единичной площади (энергетическую светимость сенсора).

Промоделирован выходной оптический сигнал сенсора при воздействии импульса механического напряжения, изменяющегося по уровню и длительности. При увеличении длительности входного механического воздействия растет задержка появления светового потока и наблюдается временной сдвиг достижения максимального значения.

При моделировании механолюминесцентного сенсора в качестве входного воздействия задавался полусинусоидального импульса механического напряжения с уровнем 60-350 МПа и длительностью 5 - 50 мс. В ответ на такое воздействие сенсор с рекомбинационным люминофором генерирует излучение с энергетической светимостью 0,2–4 Вт/м². Увеличение и пикового уровня, и длительности механического воздействия увеличивает энергетическую светимость оптического сигнала (рис. 4,а). При моделировании сенсора с внутрицентровым люминофором также на входе задавался импульсом механического напряжения полусинусоидальной формы с максимальным значением 60-350 МПа и длительностью 0,05-1,5 мс, а на выходе появлялся оптический сигнал с энергетической светимостью 5-70 Вт/м². (рис. 4,б).

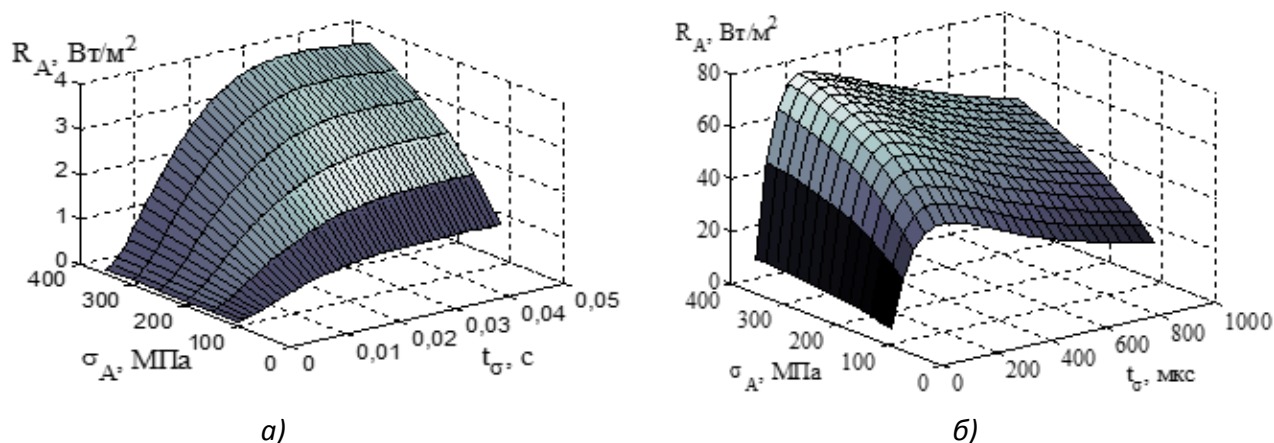


Рис. 4. Зависимости максимума энергетической светимости излучения R_A от пикового значения σ_A и временем воздействия импульса механического напряжения t_σ для датчика с рекомбинационным а) и внутрицентровым б) люминофором

При моделировании сравнивались световые отклики датчиков с механолюминесцентными элементами разных типов: внутрицентрового и рекомбинационного в ответ на одинаковые механические воздействия. Параметры импульса механического нагружения длительность 0,05 – 50 мс, амплитуда 60 – 350 МПа. Получены такие результаты. При воздействиях длительностью 0,01 – 1 мс излучение рекомбинационного люминофора (0,01 - 0,1 Вт/м²) практически незаметно в сравнении с внутрицентровым (5 - 50 Вт/м²). Но при увеличении длительности воздействия до 5 - 100 мс уже излучение рекомбинационного люминофора (0,5 - 5 Вт/м²) по интенсивности превышает излучение внутрицентрового (0,01 - 0,06 Вт/м²). Из этого следует то, что внутрицентровый люминофор лучше подходит для регистрации очень коротких по

длительности импульсов механического напряжения, а рекомбинационный люминофор считается более подходящим для регистрации более длительных импульсов механического напряжения благодаря длительному послесвечению.

Представлены результаты моделирования влияния скорости нагружения датчика на оптический выходной сигнал. На входе модели были заданы импульсы механического напряжения с максимальными значениями (1 – 60 МПа, 2 – 90 МПа, 3 – 180 МПа), достигающее определенного значения за разное время. Время достижения указанных значений давления изменялось от 20 до 2000 мкс (табл. 1).

Таблица 1. Зависимость максимальной энергетической светимости выходного импульса механолюминесцентного датчика от скорости нагружения

t_{σ} , мкс	$V=60$ МПа/ t_{σ} , МПа/мкс	$R_{\max}$ мкВт/м ²	$V=90$ МПа/ t_{σ} , МПа/мкс	$R_{\max}$ мкВт/м ²	$V=180$ МПа/ t_{σ} , МПа/мкс	$R_{\max}$ мкВт/м ²
20	3,00	35,54	4,50	50,79	9,00	72,68
50	1,20	30,27	1,80	44,85	3,60	66,57
60	1,00	28,63	1,50	43,03	3,00	64,77
100	0,60	23,35	0,90	36,56	1,80	57,75
150	0,40	17,98	0,60	29,87	1,20	50,35
200	0,30	13,77	0,45	24,32	0,90	43,86
300	0,20	8,17	0,30	16,27	0,60	33,69
400	0,15	4,84	0,22	10,92	0,45	26,04
500	0,12	2,89	0,18	7,39	0,36	20,54
1000	0,06	0,22	0,09	1,21	0,18	7,39
1500	0,04	0,02	0,06	0,21	0,12	2,97
2000	0,03	0,001	0,045	0,03	0,09	1,21

Чем выше скорость нагружения, тем интенсивнее оптический сигнал. Для одинаковых амплитуд ударного импульса интенсивнее будет сигнал при меньшей длительности входного воздействия.

Заключение

Предложено использование механолюминесцентных сенсоров в качестве датчиков давления в системах с волоконно-оптическими линиями связи. Такие сенсоры являются светогенерационными, твердотельными, вибростойкими, миниатюрными и устойчивыми к электромагнитным воздействиям. Обусловлено использование механолюминесцентных датчиков давления в системе тактильного оцувствления роботов для определения усилий сжатия схвата, регистрации контакта с внешними объектами и для определения проскальзывания объектов при удержании их захватным устройством.

Проведено моделирование выходного сигнала датчика в зависимости от параметров входных механических воздействий при использовании математической модели механолюминесцентного преобразования. Исследована механолюминесценция в

цинксульфидных кристаллофосфорах, в которых характеристики излучения определяются центрами свечения, образуемыми активаторы. В зависимости от активатора по кинетике затухания люминесценция подразделяется на внутрицентровую, характеризующуюся высоким энергетическим выходом, и рекомбинационную, характеризующуюся длительным послесвечением.

По результатам моделирования можно сделать следующие выводы:

– в случае воздействия на вход датчика импульсов динамического давления 50 ... 400 МПа и длительностью 20...2000 мкс наблюдается выходной световой отклик датчика с рекомбинационным люминофором с энергетической светимостью 0,5...4 Вт/м², датчика с внутрицентровым люминофором 0,5 ... 50 Вт/м² (сигналы такой интенсивности детектируется современными полупроводниковыми фотодиодами с пороговой освещенностью 10⁻¹⁰ лм);

– в силу порогового явления механолюминесценции механическое воздействие с амплитудой менее порога текучести материала (для ZnS 45 МПа) не вызывает генерацию излучения, однако при использовании концентраторов напряжения можно регистрировать значения ниже порога текучести;

– необходимо отметить повышенную чувствительность сенсора именно к высокоскоростному нагружению, т.е. при одинаковых по воздействиях излучение будет более интенсивным при меньшей длительности.

Список литературы

1. Suwanratchatamane K, Matsumoto M, Hashimoto S. Robotic Tactile Sensor System and Applications // Industrial Electronics, IEEE Transactions on. 2010. Vol. 57, no. 3. P. 1074 – 1087. DOI: [10.1109/TIE.2009.2031195](https://doi.org/10.1109/TIE.2009.2031195)
2. Солдатов А.В., Воротников С.А. Система силомоментного оцувствления мобильного манипуляционного робота специального Инженерный журнал: наука и инновации.2012. № 6. Режим доступа: <http://engjournal.ru/catalog/pribor/robot/248.html> (дата обращения 01.05.2015).
3. De Maria G., Natale C., Pirozzi S. Force/tactile sensor for robotic applications // Sensors and Actuators A: Physical. 2012. Vol. 175. P. 60-72. DOI: [10.1016/j.sna.2011.12.042](https://doi.org/10.1016/j.sna.2011.12.042)
4. Иванов С.Е., Филимонов П.А., Белов М.Л., Городничев М.А. Сравнение методик расчета минимально обнаруживаемой энергии приемниками при использовании ФЭУ в качестве фотодетектора // Инженерный вестник.2014. № 4. Режим доступа: <http://engbul.bmstu.ru/doc/708122.html> (дата обращения 01.05.2015).
5. Макарова Н.Ю., Татмышевский К.В., Павлов Д.Д. Принцип построения механолюминесцентного датчика перемещения и поворота // Проектирование и технология электронных средств. 2010. № 2. С. 7-9.

6. Татмышевский К.В. Научные основы расчета и проектирования механолюминесцентных чувствительных элементов датчиков импульсного давления: автореф. дис. ... док. техн. наук. М., 2010. 33 с.
7. Chandra B.P., Chandra V.K., Mahobia S.K., Jha P., Tiwari R., Haldar B. Real-time mechanoluminescence sensing of the amplitude and duration of impact stress // *Sensors and Actuators A: Physical*. 2012. Vol. 173. P. 9-16. DOI: [10.1016/j.sna.2011.09.043](https://doi.org/10.1016/j.sna.2011.09.043)
8. Kobakhidze L., Guidry C.J., Hollerman W.A., Fontenot R.S. Detecting Mechanoluminescence From ZnS:Mn Powder Using a High Speed Camera // *IEEE Sensor Journal*. 2013. Vol. 13, no. 8. P. 3053-3059. DOI: [10.1109/JSEN.2013.2261489](https://doi.org/10.1109/JSEN.2013.2261489)
9. Chandra B.P., Chandra V.K. Dynamics of the mechanoluminescence induced by elastic deformation of persistent luminescent crystals // *Journal of Luminescent*. 2012. Vol. 132, no. 3. P. 858-869. DOI: [10.1016/j.jlumin.2011.09.054](https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2011.09.054)
10. Банишев А.Ф., Банишев А.А., Лотин А.А. Исследование люминесценции и механолюминесценции мелкодисперсного порошка $\text{SrAl}_2\text{O}_4:(\text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+})$ в матрице полимера // *Физика и химия обработки материалов*. 2012. № 5. С. 89-92.
11. Писаревский А.И., Татмышевский К.В., Голубев А.М. Сравнение особенностей механолюминесценции в кристаллах ZnS и $(\text{BaSr})\text{Al}_2\text{O}_4$ // *Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн.* 2012. № 1. Режим доступа: <http://technomag.bmstu.ru/doc/297102.html> (дата обращения 01.05.2015).
12. Электронные свойства дислокаций в полупроводниках / под ред. Ю.А. Осипьяна. М.: Эдиториал УРСС, 2000. 320 с.
13. Нигматулин Р.И., Холин Н.Н. Дислокационная кинетика сверхпластичности и ползучести металлов // *Доклады АН СССР*. 1976. Т. 231, № 2. С. 303-306.
14. Гилман Дж. Микродинамическая теория пластичности // *Микропластичность: сб. науч. ст.: пер. с англ.* М.: Металлургия, 1972. С. 18-37.
15. Макарова Н.Ю., Татмышевский К.В. Стенд для экспериментального исследования механолюминесцентных датчиков импульсного давления // *Приборы и техника эксперимента*. 2006. № 1. С. 145-151.
16. Ефремов А.К., Капустян А.В. Особенности воспроизведения ударных воздействий при механических испытаниях // *Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн.* 2012. № 2. Режим доступа: <http://technomag.bmstu.ru/doc/322339.html> (дата обращения 01.05.2015).
17. Гурвич А.М. Введение в физическую химию кристаллофосфоров. М.: Высшая школа, 1982. 376 с.

Simulation of the Output Signal of the Mechanoluminescent Dynamic Pressure Sensor

N.Yu. Makarova^{1,*}

^{*}mak-nat@inbox.ru

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Keywords: mechanoluminescence, optoelectronic sensor, dynamic pressure, mathematical model

Mechanoluminescent sensor is a solid-state optoelectronic light-generating pressure transducer, which directly converts mechanical impulse into optical signal. Such sensors can be integrated into systems with fiber-optical lines, the latter being intensively used in an environment with intensive electromagnetic interference and high explosive danger. There is a proposal to use mechanoluminescent sensors in the robot tactile sensing systems that are used in extreme operating conditions. Mechanoluminescent sensor-based grippers are capable of providing information about the presence of the manipulation object, its shape and size, as well as its holding force. An informative sensor output signal is converted and processed according to a specific algorithm, which is based on a mathematical model of mechanoluminescence. The mechanoluminescence effect displays itself when luminescent centers interact with the moving dislocations accompanying the deformation process. The proposed mathematical model describes the mechanoluminescence effect for different luminescent centers, activating mechanoluminescent material – belonging to intracenter and recombination type. The model allows us to calculate the output optical signal parameters of the sensor depending on the parameters of input dynamic pressure. A range of the input pressures corresponding to the maximum values of the mechanoluminescent sensor signal was determined by simulation. The most intense signal is observed in case of a pulse load. The proposed mathematical model can be used in evaluation of the reverse transformation that is to determine the parameters of the input mechanical impulse corresponding to the output optical signal of mechanoluminescent sensor.

References

1. Suwanratchatamane K, Matsumoto M, Hashimoto S. Robotic Tactile Sensor System and Applications. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, 2010, vol. 57, no. 3, pp. 1074-1087. DOI: [10.1109/TIE.2009.2031195](https://doi.org/10.1109/TIE.2009.2031195)
2. Soldatov A.V., Vorotnikov S.A. System of Force-Moment Sensitization of Special-Purpose Mobile Manipulation Robot. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii = Engineering Jour-*

nal: *Science and Innovation*, 2012, no. 6. Available at:

<http://engjournal.ru/catalog/pribor/robot/248.html> , accessed 01.05.2015. (in Russian).

3. De Maria G., Natale C., Pirozzi S. Force/tactile sensor for robotic applications. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2012, vol. 175, pp. 60-72. DOI: [10.1016/j.sna.2011.12.042](https://doi.org/10.1016/j.sna.2011.12.042)
4. Ivanov S.E., Filimonov P.A., Belov M.L., Gorodnichev M.A. Comparison of methods for calculating the minimum detectable energy receivers using a photomultiplier as a photodetector. *Inzhenernyi vestnik MGTU im. N.E. Baumana = Engineering Herald of the Bauman MSTU*, 2014, no. 4. Available at: <http://engbul.bmstu.ru/doc/708122.html> , accessed 01.05.2015. (in Russian).
5. Makarova N.Yu., Tatmyshevskii K.V., Pavlov D.D. Principle of construction of mechanoluminescence sensor of displacement and rotation. *Proektirovanie i tekhnologiya elektronnykh sredstv*, 2010, no. 2, pp. 7-9. (in Russian).
6. Tatmyshevskii K.V. *Nauchnye osnovy rascheta i proektirovaniya mekhanolyuminescentnykh chuvstvitel'nykh elementov datchikov impul'snogo davleniya. Avtoref. dok. diss.* [Scientific bases of calculation and design of mechanoluminescent elements of pulse pressure sensors. Abstract of dr. diss.]. Moscow, 2010. 33 p. (in Russian).
7. Chandra B.P., Chandra V.K., Mahobia S.K., Jha P., Tiwari R., Haldar B. Real-time mechanoluminescence sensing of the amplitude and duration of impact stress. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2012, vol. 173, pp. 9-16. DOI: [10.1016/j.sna.2011.09.043](https://doi.org/10.1016/j.sna.2011.09.043)
8. Kobakhidze L., Guidry C.J., Hollerman W.A., Fontenot R.S. Detecting Mechanoluminescence From ZnS:Mn Powder Using a High Speed Camera. *IEEE Sensor Journal*, 2013, vol. 13, no. 8. P. 3053-3059. DOI: [10.1109/JSEN.2013.2261489](https://doi.org/10.1109/JSEN.2013.2261489)
9. Chandra B.P., Chandra V.K. Dynamics of the mechanoluminescence induced by elastic deformation of persistent luminescent crystals. *Journal of Luminescent*, 2012, vol. 132, no. 3, pp. 858-869. DOI: [10.1016/j.jlumin.2011.09.054](https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2011.09.054)
10. Banishev A.F., Banishev A.A., Lotin A.A. An investigation of photo- and mechanoluminescence of SrAl₂O₄:(Eu²⁺, Dy³⁺) fine powder in photopolymer matrix. *Fizika i khimiya obrabotki materialov = Physics and Chemistry of Materials Treatment*, 2012, no. 5, pp. 89-92. (in Russian).
11. Pisarevskii A.I., Tatmyshevskii K.V., Golubev A.M. Collation of mechanoluminescence features in the crystals of ZnS and (Ba, Sr)Al₂O₄. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana = Science and Education of the Bauman MSTU*, 2012, no. 1. Available at: <http://technomag.bmstu.ru/doc/297102.html> , accessed 01.05.2015. (in Russian).
12. Osip'yan Yu.A., ed. *Elektronnye svoystva dislokatsii v poluprovodnikakh* [Electronic properties of dislocations in semiconductors]. Moscow, Editorial URSS Publ., 2000. 320 p. (in Russian).
13. Nigmatulin R.I., Kholin N.N. Dislocation kinetics of superplasticity and creep of metals. *Doklady AN SSSR = Reports of the USSR Academy of Sciences*, 1976, vol. 231, no. 2, pp. 303-306. (in Russian).

14. Gilman J.J. Microdynamical Theory of Plasticity. In: *Microplasticity*. N.Y., John Wiley and Sons, 1968. (Ser. *Advances in Materials Research*; vol. 2.). (Russ. ed.: Gilman J.J. Mikrodinamicheskaya teoriya plastichnosti. In: *Mikroplastichnost': sb. nauch. st.* Transl. from English. Moscow, Metallurgiya Publ., 1972, pp. 18-37.).
15. Makarova N.Yu., Tatmyshevsky K.V. A table for experimental study of mechanoluminescent pulse pressure transducers. *Pribory i tekhnika eksperimenta*, 2006, no. 1, pp. 145-151. (English version of journal: *Instruments and Experimental Techniques*, 2006, vol. 49, no. 1, pp. 135-140. DOI: [10.1134/S0020441206010209](https://doi.org/10.1134/S0020441206010209)).
16. Efremov A.K., Kapustyan A.V. Some features of shock testing. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana = Science and Education of the Bauman MSTU*, 2012, no. 2. Available at: <http://technomag.bmstu.ru/doc/322339.html> , accessed 01.05.2015. (in Russian).
17. Gurvich A.M. *Vvedenie v fizicheskuyu khimiyu kristallofosforov* [Introduction to physical chemistry of crystallophosphors]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1982. 376 p. (in Russian).